

学 位 論 文 題 名

Sediment load and chemical flux in
the subarctic Tanana river basin, Alaska

(亜寒帯大流域における土砂・化学物質の流出機構
－アラスカ・タナナ川流域－)

学位論文内容の要旨

極域の河川流出量は世界の約 11%を占める。その流出源である高緯度地域の土壌内には全世界の土壌内に存在する炭素のうち 23~48%が存在し、世界の河川が海へ供給する溶存有機炭素流出の約 13%がタイガ帯からのものである。また、流域源頭部には氷河が存在する河川があり、その氷食作用によって多量の土砂が海へと供給される。そのため、物質循環の一過程として水・土砂・有機態炭素がどのような機構で河川を通じて海洋に流出するのを知ることは非常に重要である。特に、氷河域からの流出が流域に与える影響を評価したものは少なく、本研究ではそこに主眼を置き研究を行った。本研究ではアラスカ・ユーコン河支流のタナナ川において融雪期とそれに続く氷河融解期(4 月~9 月)に河川水の懸濁物質濃度(SSC)、灼熱減量、懸濁態有機炭素(POC)濃度、溶存態有機炭素(DOC)濃度の観測を行い、その起源と流出機構について考察した。

観測流域であるタナナ川は流域面積 $6.63 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、流域の 5.6%が氷河で覆われており、残りは主に不連続な永久凍土である。タナナ川本流の観測点(TNN)の他、氷河域、非氷河域それぞれからの流出の代表点としてタナナ川支流のフェランクリーク(PC)とチェナ川(CHE)で観測を行った。PC 地点は、ガルカナ氷河末端から約 2km 下流に位置する。CHE 地点は、流域に氷河はなく主に不連続な永久凍土で覆われている。観測期間は 2008 年の 4 月~9 月及び 2009 年の 4 月~6 月で、平水時は週に 1 回程度、増水時は 1~3 日に一度採水を行い、上記項目の分析を行った。TNN 地点と PC 地点には濁度計を設置して 1 時間間隔で濁度をモニタリングし、後に回帰式を用いて SSC に変換した。3 地点の流量データは米国地質調査所から提供を受けた。

2008 年 4 月の河川結氷下の流出高は 3 地点とも 0.2mm/day 程度で、観測期間中最も低かった。TNN、CHE 地点における結氷下(2009 年 4 月)の DOC 濃度、POC 濃度、SSC はそれぞれ 0.8~2.7mg/l、0.1~0.5mg/l、2.5~10mg/l で、流量同様観測期間中で最も低かった。2008 年 5 月の融雪出水による流量増大イベント時には、TNN、CHE 両地点で DOC 濃度が期間中最も高かった(10~17mg/l)一方、PC 地点は標高が高いため融雪はまだ起きていない。POC 濃度は TNN 地点で 2.5~10mg/l、CHE 地点で 1.7~6.6mg/l であった。同期間中の DOC、POC の単位面積あたりの平均日流出量はそれぞれ $6.2 \text{ kg/day} \cdot \text{km}^2$ 、 $3.4 \text{ kg/day} \cdot \text{km}^2$ (TNN)、 $12 \text{ kg/day} \cdot \text{km}^2$ 、 $2.4 \text{ kg/day} \cdot \text{km}^2$ (CHE)であり、融雪期間中の炭素流出は溶存態が主であった。氷河融解期(2008 年 6 月~9 月)の DOC、POC の単位面積あたりの平均日流出量はそれぞれ $6.3 \text{ kg/day} \cdot \text{km}^2$ 、 $6.8 \text{ kg/day} \cdot \text{km}^2$ (TNN)、 $6.1 \text{ kg/day} \cdot \text{km}^2$ 、 $1.4 \text{ kg/day} \cdot \text{km}^2$

(CHE)であり、CHE 地点では融雪期同様溶存態の流出が多いが、TNN 地点では懸濁態の流出量が溶存態を上回っている。これは、氷河融解による土砂流出の増加が原因と思われる。氷河融解期の PC 地点の日流出高は 10~25mm/day、SSC は 200~4000mg/l であり、流域に氷河の無い CHE 地点の値（平水時 0.9mm/day, ~10mg/l 増水時 ~4.3mm/day, ~130mg/l）と比べて 1~2 オーダー高い。流域に 5.6%しか氷河が存在しない TNN 地点でも氷河融解が増大するに伴い流量が増加し (0.8~4.3mm/day)、SSC も 300~2000mg/l と CHE 地点より 1 オーダー高い値となった。氷河域と非氷河域の平均日土砂流出量はそれぞれ、 $1.2 \times 10^4 \text{ kg/day} \cdot \text{km}^2$ (PC 地点)、 $44 \text{ kg/day} \cdot \text{km}^2$ (CHE 地点) であり、面積が 5.6%であっても単位面積あたりの土砂流出量が 3 オーダー高い氷河域が TNN 地点の土砂流出 ($1.1 \times 10^3 \text{ kg/day} \cdot \text{km}^2$) の主な起源となっていることがわかった。浮遊土砂中の POC 含有率は、PC 地点が約 0.1%であるのに対して、CHE 地点は約 3%であったので、含有率は低い土砂流出量が多い PC 地点の POC の平均日流出量は $11 \text{ kg/day} \cdot \text{km}^2$ となり、CHE 地点の $1.4 \text{ kg/day} \cdot \text{km}^2$ を上回った。DOC の平均日流出量は $1.8 \text{ kg/day} \cdot \text{km}^2$ (PC 地点) と $6.1 \text{ kg/day} \cdot \text{km}^2$ (CHE 地点) であり、非氷河域の方が高かった。これらから、TNN 地点における DOC の主な起源が非氷河域(永久凍土)である一方、氷河域では生物活動は少ないものの大量の土砂が氷食作用によって供給されることで高い懸濁態有機炭素流出を引き起こし、下流の TNN 地点に大きな影響を与えていることがわかった。TNN 地点の浮遊土砂中の POC 含有率が約 0.6%と低く、氷河域の値に近いこともそれを裏付けている。

TNN 地点における氷河融解期の水、土砂、DOC の流出に対する氷河域、非氷河域の寄与を明らかにするため、タンクモデルを用いて流出解析を行った。モデルでは、TNN 流域を氷河域と非氷河域に分け、氷河域は 1 段のタンクに氷河融解水と降雨を入れ、タンク内の水量に比例した流出が発生するとして流出量を計算した。非氷河域は直列 3 段タンクの最上段に降雨を入れたあと上の 2 段から蒸発散を引き、残った水量に比例した流出が発生するとした。雨量は観測値に降水量マップを用いて補正を掛けたもの、氷河融解量は観測された気温を高度補正した値を元にディグリーデイ法を用いて計算した。蒸発散量は、気温、雨量と日照時間から、ハモン法とパイク式を用いて計算した。2008 年 6 月~9 月の流量再現結果は相関係数 0.95 と良い結果となった。TNN 地点の流出中における氷河融解流出量の占める割合は 28%で、氷河の面積は 5.6%であるにも関わらず寄与が大きいことがわかった。次に、氷河域からの土砂流出とそれが一旦堆積した後河道の浸食によって流出する土砂の寄与を明らかにするため、氷河域からの流出と TNN 地点の流出それぞれの累乗に比例する土砂流出が発生するモデルを用いて SSC の再現を行った。その結果、相関係数 0.80 と良い再現性が得られた。氷河域からの直接の土砂流出の割合は 71%、河道浸食の割合は 29%であった。最後に、氷河域・非氷河域からの POC 負荷量の原単位を PC 地点・CHE 地点の観測結果から求め、それにタンクモデルで計算した氷河域・非氷河域からの流出高と面積を乗じて POC 負荷量を算出した。その結果、TNN 地点の POC 流出量に対する氷河域の寄与は 10%、非氷河域の寄与は 20%、残差 70%となった。残差は氷河性土砂が堆積後有機物を蓄積、再侵食された効果であると考えられ、氷河域の POC 流出に対する寄与が大きいことがわかった。

学位論文審査の要旨

主 査	准教授	知 北 和 久
副 査	教 授	池 田 隆 司
副 査	教 授	日 置 幸 介
副 査	教 授	見 延 庄士郎
副 査	教 授	杉 本 敦 子 (環境科学院)
副 査	准教授	工 藤 勲 (水産科学院)

学 位 論 文 題 名

Sediment load and chemical flux in the subarctic Tanana river basin, Alaska

(亜寒帯大流域における土砂・化学物質の流出機構
－アラスカ・タナナ川流域－)

近年の地球温暖化と関連し、陸域・大気・海洋での炭素循環過程については、現在多くの議論がなされている。この中で、陸域から海洋への炭素供給過程として河川流出は大きな役割を果たし、世界の河川が海へ供給する溶存有機炭素(DOC)の約 13%は高緯度のタイガ流域から流出している。本論文の研究対象であるアラスカ・タナナ川流域（面積は北海道と同程度）には、広域のタイガ帯のほか山岳氷河域（流域面積の 5.6%）が存在し、氷河域からは氷食作用によって生産された多量の土砂が海へと供給されている。このため、物質循環過程として、水・土砂・有機態炭素がどのような機構で河川を通じて海洋に流出するのかを知るとは非常に重要である。特に、氷河域からの流出が流域全体の流出に与える影響を評価した研究は極めて少なく、本研究はこの影響を観測とモデリングによって定量的に明らかにした。ここでは、4 月の結氷期、5 月の融雪期、4 月～9 月の氷河融解期に、河川流量のほか河川水の懸濁物質濃度(SSC)・懸濁態有機炭素(POC)濃度・溶存態有機炭素(DOC)濃度の連続観測を行い、得られたデータに基づく流出解析によって、水・土砂・POC・DOC の起源と流出機構について考察している。結果として、タナナ川流出量に占める氷河融解流出量の割合は 28～46%で、氷河被覆率 5.6%にも関わらず氷河域からの寄与が大きいことがわかった。また、SSC 時系列

に対する数値計算の結果、氷河域からの直接土砂流出の割合は全体の 71%、河道侵食による流出の割合は 29%であることが判明した。さらに、氷河域・非氷河域からの POC 負荷量の原単位を観測結果から求め、それに流出解析で得た氷河域と非氷河域からの流出高と面積を乗じることで、それぞれの POC 負荷量を算出した。その結果、タナナ川の POC 負荷量に対する氷河域からの直接寄与 10%、非氷河域の寄与 20%、残差 70%と評価された。この残差としては、氷河域からの流送土砂が河道内に堆積して有機物を蓄積し、これが河川増水で再侵食された効果であると判断され、氷河域の POC 負荷量に対する寄与が大きいことが明らかになった。

これを要約すると、著者は、亜寒帯大流域における水・土砂・POC・DOC の起源と流出機構について新たな知見を得たものであり、陸域・海洋間の物質循環機構解明に資するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。